

# Simulación de un sistema de fangos activados en discontinuo (SBR) para el tratamiento de aguas residuales con altos contenidos de nitrógeno

María José Palma-Acosta\* y José Manga Certain\*\*

Grupo de Investigación en Tecnologías del Agua, Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia)

---

## Resumen

Se ha seleccionado el modelo N° 1 de Fangos Activados (ASM1) con el fin de representar los procesos de eliminación biológica de nitrógeno en un sistema piloto a escala de fangos activados en discontinuo (SBR) operado bajo diferentes edades del fango (30, 20 y 12 días) y distintos números de fases anóxicas/aerobias con duraciones de 45/30, 15/15 y 10/5 minutos. Los principales parámetros cinéticos y estequiométricos del ASM1 fueron calibrados para las distintas condiciones de operación. Como herramienta informática para la simulación del sistema se utilizó el programa AQUASIM, en el cual se implementó el modelo ASM1. Los resultados obtenidos indican, para las diferentes condiciones de operación, que la disminución de la duración de las fases anóxicas/aerobias favorece la ocurrencia del proceso de nitrificación. Igualmente, el incremento en la edad del fango favoreció el crecimiento de la biomasa autótrofa responsable del proceso de nitrificación. En relación con el proceso de desnitrificación, éste se vio afectado al disminuir la edad del fango y la duración de las fases. En general, para las condiciones evaluadas en este estudio, para una adecuada eliminación de materia orgánica y nitrógeno, se recomienda la utilización de altos tiempos de retención celular y fases anóxicas/aerobias de duraciones intermedias. Mediante este trabajo se mostró la capacidad del modelo ASM1 para reproducir las distintas condiciones de operación estudiadas en el sistema.

**Palabras claves:** Reactor de fangos activados en discontinuo, modelación matemática, modelo N° 1 de fangos activados (ASM1), eliminación biológica de nutrientes.

Fecha de recepción: 11 de mayo de 2005  
Fecha de aceptación: 13 de noviembre de 2005

---

\* Ingeniero Civil, Universidad del Norte. Especialista en Ingeniería de Saneamiento Ambiental, de la misma universidad. [mpalma@uninorte.edu.co](mailto:mpalma@uninorte.edu.co)

\*\* Ingeniero Civil, Universidad del Norte. Doctorado en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia (España). Profesor e investigador del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Norte. [jmanga@uninorte.edu.co](mailto:jmanga@uninorte.edu.co), [gta@uninorte.edu.co](mailto:gta@uninorte.edu.co)

Dirección: Uninorte, Km 5 vía a Puerto Colombia, Barranquilla (Colombia).

## Abstract

*Activated Sludge Model No.1 (ASM1) have been selected to describe biological degradation processes for nitrogen removal in a scaled pilot plant operated under different sludge ages (30, 20 and 12 days) and anoxic/aerobic phase durations of 45/30, 15/15 and 10/5 minutes. The main kinetics and stoichiometric parameters in ASM1 were determined for the different operating conditions. As computational tool for simulating the system has been used AQUASIM. The results show that a decrease in anoxic/aerobic phase duration was satisfactory for nitrification occurrence. Similarly, increase in sludge age improved the growth of autotrophic biomass responsible for nitrification process. Regarding denitrification process, this was influenced for both, a decrease in sludge age and anoxic/aerobic phase durations. In general, for evaluated conditions, high sludge ages and mean anoxic/aerobic phase durations are recommended for an effective organic matter and nitrogen removal. Through this study, the capacity of ASM1 to represent the different operating conditions was recognized.*

**Key words:** Sequencing Batch Reactor, mathematical modeling, Activated Sludge Model N° 1 (ASM1), nitrogen removal.

---

## INTRODUCCIÓN

El nitrógeno contenido en las aguas residuales puede estar presente bajo diferentes especies químicas. En las aguas residuales urbanas, éste se presenta principalmente en la forma de nitrógeno amoniacal y sirve como nutriente a los microorganismos, incorporándose a su masa en el proceso de crecimiento biológico. Con la muerte de la biomasa, una fracción de este nitrógeno amoniacal se libera y regresa al agua; mientras que otra fracción queda fija en los microorganismos en la forma de nitrógeno orgánico y se elimina del sistema por la purga. La eliminación biológica del nitrógeno contenido en el agua residual se lleva a cabo en dos etapas. En la primera tiene lugar el proceso de nitrificación, o lo que es lo mismo, la transformación de amonio a nitrato, y en la segunda, la desnitrificación, que es la reducción de nitrato a nitrógeno gaseoso.

En la actualidad, una de las tecnologías más apropiadas para la eliminación biológica de materia orgánica y nitrógeno la constituyen los sistemas de fangos activados en discontinuo (*Sequencing Batch Reactor* o SBR) [1, 2]. Debido a su alto nivel de automatización y control, que permite modificar las condiciones de operación en función de las características del agua residual afluente al sistema de tratamiento, los sistemas de fangos activados en discontinuo (SBR) se constituyen en una alternativa para la eliminación biológica de materia orgánica y nutrientes de las aguas residuales, tanto domésticas como industriales [3,

4, 5]. Dada su flexibilidad de operación, es posible introducir las condiciones requeridas para la eliminación de materia orgánica y nitrógeno, que implican la secuencia de fases anóxicas y aerobias durante el ciclo de operación, y que generan las condiciones necesarias para la ocurrencia de procesos como la nitrificación y la desnitrificación.

Dada la complejidad que representan los numerosos procesos que tienen lugar en los sistemas de fangos activados para la eliminación de materia orgánica y nutrientes, la utilización de modelos matemáticos se ha convertido en una herramienta analítica de gran valor entre los investigadores. El modelo de fangos activados N° 1 ( $ASM_1$ ), el cual ha sido propuesto por el *IWA Task Group On Mathematical Modelling For Design and Operation Of Biological Wastewater Treatment Processes*, está basado en una interpretación mecanicista del comportamiento de los organismos y ha demostrado ser capaz de dar una descripción adecuada del comportamiento de los sistemas de fangos activados para la eliminación de materia orgánica y de nitrógeno para un amplio número de configuraciones [6, 7].

El modelo de fangos activados  $ASM_1$  describe fundamentalmente los procesos de remoción de materia orgánica y nitrógeno (nitrificación y desnitrificación) con el consumo simultáneo de oxígeno y nitrato como acceptor de electrones. Incluye ocho procesos, de los cuales tres están relacionados con el crecimiento de la biomasa heterótrofa y autótrofa, dos representan los procesos de lisis de la biomasa y tres describen los procesos de hidrólisis de la materia orgánica y del nitrógeno orgánico [8, 9, 10].

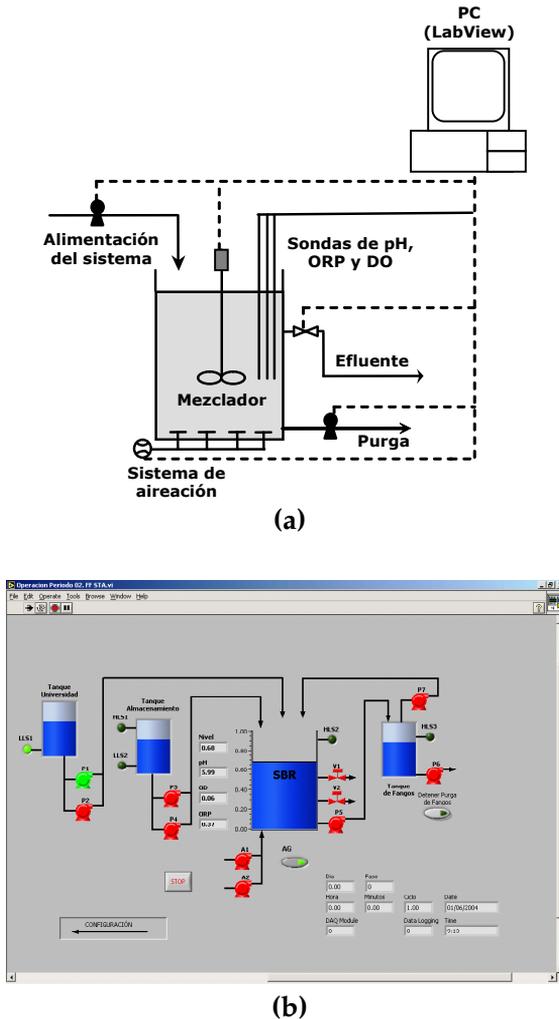
En este estudio se seleccionó un modelo de fangos activados  $ASM_1$  con el fin de representar los procesos de eliminación biológica de nitrógeno en un sistema piloto de fangos activados en discontinuo (SBR) operado bajo diferentes edades del fango y distintos números de fases anóxicas/aerobias. Los principales parámetros cinéticos y estequiométricos incluidos en el modelo fueron determinados mediante el uso de técnicas respirométricas, empleando el fango procedente del sistema piloto. Para la simulación del sistema de estudio se empleó el programa *AQUASIM*, en el cual se implementó el modelo de fangos activados N° 1 ( $ASM_1$ ).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### **Sistema piloto de fangos activados en discontinuo (SBR)**

El sistema piloto de fangos activados en discontinuo (SBR) operado para el

desarrollo de este estudio lo conforman el tanque de almacenamiento, el tanque reactor y el tanque de fangos. En su interior, el tanque reactor está conformado por cuatro difusores de burbuja fina que hacen parte del sistema de aireación (conjunto difusor-soplante), el mezclador y las sondas on-line de oxígeno disuelto, potencial de hidrógeno (pH) y potencial de oxido – reducción (ORP) (véase figura 1). Su alto nivel de automatización y control permite la configuración del sistema de acuerdo a las condiciones requeridas para la ocurrencia de los diferentes procesos biológicos de depuración del agua residual.



**Figura 1.** (a) Esquema del sistema piloto de fangos activados en discontinuo (SBR). (b) Interfaz gráfica para la operación del sistema piloto

La configuración empleada para la operación del sistema de fangos activados en discontinuo (SBR) en este estudio, permitió llevar a cabo la alimentación del sistema directamente al reactor y emplear ciclos de ocho horas con fases anóxicas y aerobias de duración constante.

### Condiciones de operación del sistema

El sistema fue alimentado con las aguas residuales de la Universidad del Norte y se operó bajo tres diferentes tiempos de retención celular (30, 20 y 12 días) y tres diferentes condiciones de duración de las fases anóxicas y aerobias (45 - 30, 15 - 15 y 10 - 5 minutos), para un total de nueve condiciones de operación a evaluar (véase tabla 1).

**Tabla 1**  
Condiciones de operación simuladas

	1			2			3		
Edad del fango (días)	30			20			12		
Duración de las fases (minutos)									
anóxicas – aerobias	45-30	15-15	10-5	45-30	15-15	10-5	45-30	15-15	10-5
Número de fases									
anóxicas – aerobias	5-5	13-13	26-26	5-5	13-13	26-26	5-5	13-13	26-26

### AQUASIM

Para el desarrollo de esta investigación se seleccionó como herramienta informática el programa AQUASIM, desarrollado por el Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG). AQUASIM está diseñado para realizar simulaciones unidimensionales transitorias de sistemas acuáticos. Su principal ventaja es que posee las ecuaciones de conservación para diversos tipos de sistemas, por lo que únicamente se requiere proporcionar las condiciones de operación y un modelo de conversión que pueda ser ajustado y corregido para ajustarse a las mediciones experimentales [11]. Para los fines de este estudio, el modelo de fangos activados N° 1 (ASM1) fue implementado en la plataforma de AQUASIM considerando el sistema como un reactor completamente mezclado con flujo de entrada restringido.

## Calibración del modelo

Los valores de los parámetros cinéticos y estequiométricos utilizados en el modelo  $ASM1$  fueron calibrados en laboratorio, para las diferentes edades del fango estudiadas, mediante la aplicación de técnicas respirométricas. La metodología de calibración utilizada consistió en la calibración selectiva de los parámetros con mayor influencia mediante experimentos en discontinuo realizadas en laboratorio con biomasa procedente del sistema piloto de fangos activados.

Se determinaron los valores de los parámetros cinéticos y estequiométricos más importantes de los procesos de nitrificación y desnitrificación: rendimiento de las bacterias heterótrofas ( $Y_H$ ), velocidad máxima de crecimiento aerobio de la biomasa heterótrofa ( $m\ddot{o}_H$ ) y autótrofa ( $m\ddot{o}_A$ ), el coeficiente de crecimiento anóxico de la biomasa heterótrofa ( $\delta h\ddot{o}_s$ ) y los parámetros cinéticos de la muerte de la biomasa heterótrofa ( $b_H$ ) y autótrofa ( $b_A$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización del agua residual afluyente al sistema piloto

El reactor de fangos activados en discontinuo fue alimentado con las aguas residuales de la Universidad del Norte. Los valores promedio obtenidos de la caracterización del agua residual afluyente al sistema piloto durante los diferentes períodos estudiados se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 2**  
Valores medios de entrada al sistema piloto (Componentes del  $ASM1$ )

Componente soluble	Unidades	Valor promedio	Componente particulado	Unidades	Valor promedio
$S_S$	$g\ DQO/m^3$	158.0	$X_I$	$g\ DQO/m^3$	17.3
$S_{NH}$	$g\ N/m^3$	63.1	$X_D$	$g\ DQO/m^3$	0
$S_{ND}$	$g\ N/m^3$	11.1	$X_H$	$g\ DQO/m^3$	0
$S_{NO}$	$g\ N/m^3$	1.6	$X_A$	$g\ DQO/m^3$	0
$S_I$	$g\ DQO/m^3$	85.1	$X_S$	$g\ DQO/m^3$	54.0
$S_{ALK}$	$mol\ CaCO_3/m^3$	7.0	$X_N$	$g\ DQO/m^3$	1.7

## Parámetros cinéticos y estequiométricos

La tabla 3 recoge el conjunto de parámetros cinéticos y estequiométricos calibrados en esta investigación.

**Tabla 3**

Valores recomendados de los parámetros cinéticos y estequiométricos más relevantes en el proceso de eliminación biológica de materia orgánica y nitrógeno

Parámetro	Definición	Unidades	Valor promedio	Valor literatura [2,6]
<b>Parámetros estequiométricos</b>				
$Y_H$	Rendimiento de la biomasa heterótrofa	g DQO formada / g DQO oxidada	0.67	0.38-0.75
$Y_A$	Rendimiento de la biomasa autótrofa	g DQO formada / g N oxidado	0.24	0.07-0.28
<b>Parámetros cinéticos</b>				
$m_{H-MAX}$	Velocidad máxima de crecimiento de la biomasa heterótrofa	$d^{-1}$	1.11	0.6 - 13.2
$m_{A-MAX}$	Velocidad máxima de crecimiento de la biomasa autótrofa	$d^{-1}$	0.52	0.2 - 1.0
$K_s$	Constante de semisaturación para el crecimiento de la biomasa heterótrofa	g DQO / $m^3$	11.94	10 – 180
$K_{NH_4}$	Constante de semisaturación para el crecimiento de la biomasa autótrofa	g N – $NH_4$ / $m^3$	2.87	0.06-5.6
$b_H$	Constante de velocidad de lisis de la biomasa heterótrofa	$d^{-1}$	0.62	0.05 - 1.6
$b_A$	Constante de velocidad de lisis de la biomasa autótrofa	$d^{-1}$	0.12	0.05 - 0.2
$h_g$	Factor de reducción para la desnitrificación	Adimensional	0.79	0.6 – 1.0

## Simulación del funcionamiento del sistema piloto

Mediante el uso del modelo se simularon las nueve condiciones de operación estudiadas en planta piloto. Estas simulaciones fueron llevadas a cabo empleando los valores promedio de los parámetros cinéticos y estequiométricos

calibrados para las tres edades del fango estudiadas, y la caracterización del agua residual afluyente obtenida durante el período de estudio. Los resultados de las simulaciones fueron comparados con los valores experimentales obtenidos en planta piloto, considerando el efecto de las variaciones en la edad del fango y la duración de las fases anóxicas/ aerobias sobre los procesos de nitrificación y desnitrificación, y la eliminación de materia orgánica.

La tabla 4 muestra las remociones de nitrógeno amoniacal ( $N-NH_4$ ) simuladas y las obtenidas experimentalmente para las diferentes condiciones de funcionamiento estudiadas.

**Tabla 4**

Comparación de los resultados de la simulación con los resultados experimentales obtenidos para la remoción de  $N-NH_4$  en el sistema piloto de fangos activados (SBR)

Remociones de nitrógeno amoniacal ( $N - NH_4$ )						
Edad del fango	30-45		15-15		5-10	
	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado
30	54.5%	59.8%	84.0%	99.8%	89.0%	99.6%
20	54.3%	38.1%	80.9%	99.7%	83.5%	99.7%
12	18.2%	14.7%	78.1%	97.0%	77.9%	99.7%

En general, para las diferentes condiciones de operación evaluadas, se observó que al disminuir la duración de las fases anóxicas/ aerobias se favoreció la ocurrencia del proceso de nitrificación. Lo anterior se ha relacionado con un aumento en el tiempo de retención celular aerobio del sistema ocasionado por el incremento del número de fases aerobias durante el ciclo. Como se observa en la figura 2, los ciclos con fases anóxicas/ aerobias de 45 y 30 minutos presentaron menores remociones de  $N-NH_4$  que las registradas para las restantes condiciones de operación. Estas bajas tasas de nitrificación en comparación con las registradas para las condiciones anóxicas aerobias de 15/15 y 10/5 se han asociado con el aumento de la población de microorganismos autótrofos generada por el incremento de las condiciones aerobias en el sistema durante la operación de estas condiciones de funcionamiento. La tabla 5 presenta la concentración de bacterias autótrofas obtenida mediante la simulación de las diferentes condiciones de operación del sistema.

**Tabla 5**  
Población de microorganismos autótrofos presentes en el sistema

<b>Población de bacterias autótrofas (g DQO/m<sup>3</sup>)</b>			
<b>Edad del fango</b>	<b>45-30</b>	<b>15-15</b>	<b>10-5</b>
30	188.4	319.9	348.7
20	122.6	222.7	226.4
12	48.7	194.4	209.3

Respecto al efecto del tiempo de retención celular, se observó que al disminuir éste se afectó la población de bacterias nitrificantes en el sistema, lo que se ve reflejado en las bajas concentraciones de microorganismos autótrofos obtenidas para la edad del fango de 12 días (véase tabla 5). Lo anterior sugiere que bajos tiempos de retención celular limitan las condiciones requeridas para la ocurrencia del proceso de nitrificación. En este sentido, la condición menos favorable correspondió al tiempo de retención celular de 12 días con fases anóxicas/aerobias de 45/30 minutos de duración. Para este mismo tiempo de retención celular, las condiciones 15/15 y 10/5 minutos presentaron un aumento de la población de microorganismos autótrofos dado el incremento del tiempo de reacción aerobio en el sistema.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el proceso de desnitrificación fue afectado por la disminución del tiempo de reacción anóxico en el sistema (condiciones 15/15 y 10/5). Las mayores eficiencias de eliminación de los nitratos ( $N-NO_3$ ) fueron las obtenidas empleando fases anóxicas con una duración de 45 minutos (véase tabla 6). Lo anterior puede atribuirse a una restricción de las condiciones anóxicas requeridas para la ocurrencia del proceso de desnitrificación, como resultado del aumento del número de fases anóxicas/aerobias en el ciclo del sistema piloto.

**Tabla 6**  
Comparación de los resultados de la simulación con los resultados experimentales obtenidos para la remoción de  $N-NH_4$  en el sistema piloto de fangos activados (SBR)

<b>Remociones de nitratos (N - NO<sub>3</sub>)</b>						
<b>Edad del fango</b>	<b>30-45</b>		<b>15-15</b>		<b>5-10</b>	
	<b>Medido</b>	<b>Simulado</b>	<b>Medido</b>	<b>Simulado</b>	<b>Medido</b>	<b>Simulado</b>
30	96.0%	93.7%	70.3%	70.5%	52.7%	42.5%
20	94.9%	99.8%	64.0%	70.0%	51.9%	53.6%
12	64.2%	99.8%	74.4%	74.5%	56.8%	50.9%

La variación del tiempo de retención celular presentó una menor incidencia sobre el proceso de desnitrificación. Tanto los valores simulados como los determinados experimentalmente indican que el aumento el tiempo de retención celular no ocasionó variaciones significativas en la remoción de los nitratos ( $N-NO_3$ ). En este caso, se esperaría que al aumentar el tiempo de retención celular, la tasa de desnitrificación aumentara debido a la disposición de una fuente endógena de carbono para la población de bacterias heterótrofas. Sin embargo, la obtención de altas tasas de desnitrificación se ve favorecida por la composición del agua residual afluente al sistema, que determinará la disponibilidad de una fuente de materia orgánica fácilmente degradable durante las fases anóxicas.

Los resultados presentados anteriormente indican una adecuada correspondencia entre los valores simulados y los experimentales, lo cual sugiere que el modelo de fangos activados ASM1 representó satisfactoriamente el comportamiento metabólico de las poblaciones estudiadas en el sistema piloto de fangos activados en discontinuo (SBR) para la eliminación de nitrógeno. Igualmente, para todos los casos, el modelo representó adecuadamente los valores de eliminación de materia orgánica.

## CONCLUSIONES

En general, para las condiciones evaluadas en este estudio se ha determinado como una condición apropiada para la eliminación de materia orgánica y nitrógeno, la utilización de fases anóxicas y aerobias de igual duración, de tal forma que los procesos de nitrificación y desnitrificación no se afecten por la ausencia de condiciones adecuadas para el desarrollo de las poblaciones responsables de los mismos. Adicionalmente, la utilización de altos tiempos de retención celular favorecerá el crecimiento de la población autótrofa y, como consecuencia, se generarán mejores condiciones para la ocurrencia del proceso de nitrificación. Para este caso, se proponen tiempos de retención celular dentro del rango de 20 a 30 días y fases anóxicas / aerobias con una duración de 15/15 minutos.

### *Reconocimientos*

Este estudio de investigación fue financiado por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas” – COLCIENCIAS a través del Programa de Jóvenes Investigadores e Innovadores.

## REFERENCIAS

- [1] WILDERER, P.A., IRVINE, R.L. & GORONSKY, M. (2001). *Sequencing Batch Reactor Technology*. Scientific and Technical Report N° 10, London, IWA.
- [2] GRADY, C.P.L., DAIGGER, G. & LIM, H. (1999). *Biological Wastewater Treatment*.
- [3] RAO, Y., SURAMPALLI, R.D., TYAGI, O., SCHEIBLE, K. & HEIDMAN, J.A. (1997) "Nitrification, denitrification and phosphorus removal in Sequential Batch Reactors". *Bioresource Technology*, vol. 61, 151 - 157.
- [4] WHICHARD, D. (2001). *Nitrogen removal from dairy manure wastewater using sequencing batch reactors*. Thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Environmental Engineering. Virginia, Estados Unidos, p. 1-350.
- [5] DAE SUNG, L., CHE OK, J. & JONG, M.P. (2001). "Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a Sequencing Batch Reactor using single sludge system", *Wat. Res.*, vol. 35, N° 16, 3968-3976.
- [6] HENZE, M., GRADY, C.P.L., GUJER, W., MARAIS, G.V.R. & MATSUO, T. (1987). *Activated sludge model No.1 by IAWPRC task group on mathematical modeling for design and operation of biological wastewater treatment*. Scientific and Technical Report N° 1, London, IAWPRC.
- [7] DOLD, P.L., EKAMA, G.A. & MARAIS, G.V.R. (1986). "Evaluation of the general activated sludge model proposed by the IAWPRC task group". *Water Science and Technology*, vol. 18, 63-89.
- [8] PETERSEN, B., GERNAEY, K., HENZE, M. & VANROLLEGHEM, P.A. (2003). Calibration of activated sludge models: A critical review of experimental designs. *Biotechnology for the Environment: Wastewater Treatment and Modeling, Waste Gas Handling*. S.N. Agathos & W. Reineke (Eds.). Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- [9] COELHO, M. A. Z., RUSSO, C. & ARAÚJO, O.Q.F. (2000). Optimization of a sequencing batch reactor for biological nitrogen removal. *Wat. Res.*, vol. 34, N° 10, 2809-2817.
- [10] MANGA CERTAIN, J. (2002). Curso de tratamientos avanzados de aguas residuales. Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia).
- [11] REICHERT, P. (1994). AQUASIM – A tool for simulation and data analysis of aquatic systems. *Water Science and Technology*, vol. 30, N° 2, 21-30.